

125 лет со дня открытия рентгеновских лучей

А.Г. Ревенко

Институт земной коры СО РАН, Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, Лермонтова, 128

Адрес для переписки: Ревенко Анатолий Григорьевич, E-mail: xray@crust.irk.ru

Поступила в редакцию 3 марта 2020 г., после исправления – 10 марта 2020 г.

Рассмотрен вклад российских физиков в исследование особенностей рентгеновского излучения и развитие вариантов его применения на практике. Активное участие в распространении информации о рентгеновских лучах и их свойствах принимали российские учёные (Ф.Ф. Петрушевский, А.С. Попов, П.Н. Лебедев, И.И. Боргман, Н.Г. Егоров, О.Д. Хвольсон и др.). Морской офицер-медик В.С. Кравченко в 1904 г. впервые в истории морской медицины использовал рентгеновские лучи для диагностических целей в условиях морского похода на борту крейсера «Аврора». Г.В. Вульф дал теоретическое обоснование результатам Л. Брэгга по исследованию отражения рентгеновских лучей от плоскости спайности слюды. В 1914 г. талантливый инженер-технолог Н.А. Федорицкий подготовил и реализовал технический проект автомобиля-рентгеновского кабинета. В лабораториях Ленинградского физико-технического института (организован в 1918 г.) была создана научная база для исследований по рентгенофизике и развития рентгенографического анализа в Советском Союзе. Кратко рассмотрен вклад И.Б. Боровского, М.А. Блохина, Э.Е. Вайнштейна, К.И. Нарбутта, Р.Л. Баринского, Н.И. Комяка, Н.Ф. Лосева и М.А. Кумахова. Основное внимание автор уделил одному из направлений рентгеноспектрального анализа – применению его для определения химического состава материалов. Автор разделяет заключение Н.П. Ильина (2002 г): «Нашими специалистами разрабатывались практически все основные направления рентгеноспектрального анализа, а в решении ряда теоретических и методических вопросов они опережали своих зарубежных коллег».

Ключевые слова: 125 лет со дня открытия рентгеновских лучей, вклад российских физиков

For citation: *Analitika i kontrol'* [Analytics and Control], 2020, vol. 24, no. 1, pp. 66–79

DOI: 10.15826/analitika.2020.24.1.008

125 years since the discovery of X-rays

A.G. Revenko

Institute of the Earth's Crust, SB RAS, 128 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation.

**Corresponding author: Anatolii G. Revenko, E-mail: xray@crust.irk.ru*

Submitted 03 March 2020, received in revised form 10 March 2020

The contribution of the Russian physicists to the study of the features of X-ray radiation and the development of options for its application in practice is discussed. Russian scientists (F.F. Petrushevsky, A.S. Popov, P.N. Lebedev, I.I. Borgman, N.G. Egorov, O.D. Hvolson and others) took an active part in proliferating the information about X-rays and their properties. V.S. Kravchenko, a naval medical officer, in 1904 for the first time in the history of marine medicine used X-rays for the diagnostic purposes in the conditions of a sea voyage on board the "Aurora" cruiser. G.V. Wulf gave a theoretical justification for the results of L. Bragg's research on the reflection of X-rays from the mica cleavage plane. In 1914, a talented engineer N.A. Fedoritsky prepared and implemented a technical project of a car X-Ray cabinet. In the laboratories of the Leningrad Institute of Physics and Technology (founded in 1918 by A. Ioffe), a scientific base was created for the research of X-ray physics and the development of X-ray diffraction analysis in the Soviet Union. The contribution of I.B. Borovsky, M.A. Blokhin, E.E. Weinstein, K.I. Narbutt, R.L. Barinsky, N.I. Komyak, N.F. Losev and M.A. Kumakhov is briefly examined. The author focused on one of the directions of X-ray spectral analysis - its use to determine the chemical composition of materials. The author shares N. P. Ilyin's conclusion (2002): "Our specialists developed almost all the main areas of X-ray spectral analysis, and they were ahead of their foreign colleagues in solving a number of theoretical and methodological issues."

Key words: 125 years since the discovery of x-rays, the contribution of Russian physicists

ВВЕДЕНИЕ

В марте 2020 г. исполняется 175 лет со дня рождения В.К. Рентгена, а в ноябре – 125 лет со дня открытия рентгеновских лучей [1]. Об этих важных для физики датах (1845 г. и 1895 г.) имеется обширная литература. Ограничимся здесь некоторыми ссылками [2–4]. В настоящей работе сделана попытка осветить вклад физиков нашей страны в исследование особенностей этого вида излучения и развитие вариантов применения его на практике. Как это начиналось, кто принимал участие, как складывалась практика применения рентгеновского излучения для определения химического состава разнообразных материалов в России и после 1917 г. в Советском Союзе?

Основное внимание автор уделит одному из направлений рентгеноспектрального анализа (РСА) – применению его для определения химического состава материалов. Необходимо отметить, что в ходе развития теории и разработки нового оборудования области применения рентгеновского излучения в науке и промышленности постоянно расширялись. Развитие науки способствовало узкой специализации. Так, например, начиная с 1935 г. обсуждение возможностей рентгеновского излучения для решения практических задач науки и техники проводилось на Всесоюзных совещаниях по применению рентгеновских лучей к исследованию материалов [5, 6]. Автор принимал участие в работе VIII совещания (Ленинград, 1964) в качестве слушателя. Здесь рассматривались проблемы рентгеноструктурного анализа металлов и сплавов, минералов и химсырья, рентгеновской аппаратуры, электронографии, дефектоскопии и рентгеновской спектроскопии (изучение тонкой структуры рентгеновских спектров эмиссии и поглощения и рентгеноспектральный анализ). Это было последнее совещание этой серии, на котором

были представлены доклады по рентгеновской спектроскопии. С 1955 г. проводились совещания именно по рентгеновской спектроскопии, а с 1986 – по рентгеноспектральному анализу. С середины 60-х годов прошлого века стали организовываться независимые совещания по рентгеноспектральным локальным исследованиям. В соответствии с этим в первой половине обзора рассматривается вклад отечественных исследователей в изучение свойств рентгеновского излучения и пионерские работы в различных областях его применения. Во второй части кратко рассмотрены наиболее важные моменты в развитии РСА. Автор надеется, что коллеги из смежных областей смогут дополнить картину для более цельного впечатления о развитии исследований с применением рентгеновского излучения в нашей стране.

НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД (1896–1900 гг.)

Остановимся на некоторых моментах из истории открытия рентгеновских лучей. Уместно вспомнить В.К. Рентгена (1845–1923 гг.), обратившего внимание на неизвестное излучение – **x-ray** (рис. 1) и исследовавшего основные свойства этого излучения [1]. Далее, безусловно, М. Лауэ (1879–1960 гг.), разработавшего теорию интерференции рентгеновских лучей на кристаллах, и предложившего использовать кристаллы в качестве дифракционной решетки для рентгеновских лучей (рис. 2). Автор не считает необходимым обсуждать в настоящей работе вклад нобелевских лауреатов по физике и химии за исследования рентгеновского излучения, так как это подробно рассмотрено во многих монографиях.

Первые попытки применить открытие неизвестных ранее лучей в хирургии были сделаны через две недели после опубликования пионерской статьи В.К. Рентгена. Так, в январе 1896 г. рентгеновскими лучами занялся изобретатель радио, ученик Ф.Ф. Петрушевского А.С. Попов (1859–1906 гг.) (рис. 3), сделавший аппарат для получения рентгеновских лучей. Этот аппарат был построен через



Рис. 1. В.К. Рентген
Fig. 1. W.C. Röntgen



Рис. 2. М. Лауэ
Fig. 2. M. Laue



Рис. 3. А.С. Попов

Fig. 3. A.S. Popov

две недели после опубликования сообщения В.К. Рентгена и был использован для обнаружения ружейной дроби, застрявшей в теле раненого. Об увлечении А.С. Попова открытыми В.К. Рентгеном лучами можно прочитать в книге М. Радовского [7], где автор сообщает, что осенью 1897 г. А.С. Попов оборудовал первый в России рентгеновский кабинет в Николаевском военно-морском госпитале в Кронштадте. В обзорной статье В.Я. Френкеля [2] отмечалось, что уже в 1896 г. было опубликовано более 1000 работ, посвящённых исследованиям с рентгеновскими лучами. В соответствии с его оценкой в «Журнале русского физико-химического общества» за этот год появилось 103 публикации по «рентгеновской» тематике. Правда, в основном это была краткая информация об отдельных исследованиях зарубежных авторов.

Российские учёные принимали активное участие в распространении информации о рентгеновских лучах и их свойствах. 19 января 1896 г. П.Н. Лебедев (рис. 4) (впервые измеривший давление света на твёрдое тело – 1901 г., и на газы – 1908 г.) сделал снимок своей руки и демонстрировал его на своих публичных лекциях об открытии В.К. Рентгеном икс-лучей в Санкт-Петербургском университете 29 января и 8 февраля 1896 г. В С.-Петербурге Ф.Ф. Петрушевский (1828–1904 гг.) (рис. 5) и И.И. Боргман (1849–1914 гг.) (рис. 6) одними из пер-



Рис. 4. П.Н. Лебедев

Fig. 4. P.N. Lebedev



Рис. 5. Ф.Ф. Петрушевский

Fig. 5. F.F. Petrushevsky



Рис. 6. И.И. Боргман

Fig. 6. I.I. Borgman

вых в России повторили опыты В.К. Рентгена. В 70-е годы прошлого века автор данной статьи посетил выставку в краеведческом музее г. Ростова-на-Дону, посвящённую Л.Н. Толстому. Запомнилась фотография с подписью: «Л.Н. Толстой слушает лекцию проф. Ф.Ф. Петрушевского о рентгеновских лучах».

Ф.Ф. Петрушевский, ученик Э.Х. Ленца, в 1865–1901 гг. – заведующий кафедрой физики в Санкт-Петербургском Университете, с 1872 г. – первый председатель Российского физического общества, а



Рис. 7. А.Л. Гершун

Fig. 7. A.L. Gershun



Рис. 8. Н.Г. Егоров

Fig. 8. N.G. Egorov



Рис. 9. О.Д. Хвольсон

Fig. 9. O.D. Khvol'son

после слияния этого общества с химическим (1878 г.) оставался до 1901 г. бессменным председателем физического отделения Русского физико-химического общества. Его ученик И.И. Боргман совместно с А.Л. Гершуном (1868–1915 гг.) (рис. 7) исследовал влияние рентгеновских лучей на электрический разряд. В работе «Об электрических действиях лучей Рентгена» (С.-Петербург. 1896. 4 с.) были установлены новые по тому времени факты, относящиеся к ионизирующему действию рентгеновского излучения.

Русский физик-экспериментатор Н.Г. Егоров (1849–1919 гг.) (рис. 8) 16 января 1896 г. сделал рентгеновский снимок кисти руки, организовал первую в России рентгеновскую лабораторию и изучал рентгеновские лучи и их свойства [8]. Русский физик, чл.-корр. Петербургской АН О.Д. Хвольсон (рис. 9) (1852–1934 гг.) сконструировал актинометр и пиргелиометр, лучшие в то время приборы. Блестящий лектор и популяризатор физики, автор пятитомного «Курса физики» [8, 9], он также написал свыше 30 научно-популярных книг, в том числе «Лучи Рентгена» (1896 г.).

25 сентября 1897 г. в Иркутске доктор Г.И. Мультике впервые продемонстрировал иркутянам принцип действия рентгеновского аппарата [10]. Иркутская городская детская (Ивано-Матрёнинская) больница в конце XIX века имела на вооружении рентгеновскую установку. Тогда лишь в этой и одной из московских больниц имелись рентген-аппараты.

НАЧАЛО XX ВЕКА (1901-1917 гг.)

Состояние дел с исследованиями в области физики в конце XIX – начале XX века охарактеризовал А.Ф. Иоффе [11]: «Строение атомов и кристаллов, рентгеновы и оптические спектры атомов, и загадка сверхпроводимости – вот чем жила физика в период перед первой мировой войной». Отметим здесь некоторые факты, связанные с темой данной статьи.

Морской офицер-медик В.С. Кравченко в 1904 г. впервые в истории морской медицины использовал рентгеновские лучи для диагностических целей в условиях морского похода [12, 13]. На борту крейсера «Аврора» (см. рис. 10) после морского сражения в Цусимском проливе, он обследовал 40 раненых матросов с помощью рентгеновских лучей. Раненые были прооперированы по этим снимкам в американском госпитале в Маниле. Стационарный рентгеновский аппарат в госпитале оказался неисправен. «Самолюбие американцев было, видимо, этим сильно задето» – вспоминал В.С. Кравченко [13].

Особо необходимо отметить вклад Георгия (Юрия) Викторовича Вульфа (1863–1925 гг.) (рис. 11), который опубликовал свою работу «Über die Kristallröntgenogrammen» в марте 1913 г. [14]. Он дал теоретическое обоснование результатам У.Л. Брэгга (1890–1971 гг.) по исследованию отражения рентгеновских лучей от плоскости спайности слюды [15]. Используя предложенную М. Лауэ [16] теорию, Г.В. Вульф вывел известную формулу, которая в дальнейшем получила название уравнения У.Л. Брэгга, а в нашей стране – Брэггов-Вульфа. Статья У.Л. Брэгга с аналогичным уравнением опубликована в феврале 1913 г. [17]. Однако сторонники (последователи) У.Л. Брэгга указывают на его приоритет на основании его устного доклада в декабре 1912 г. Такова история этого вопроса, подробно изложенная в работе А.М. Смолеговского и П.М. Зоркого, изданной к 100-летию со дня рождения У.Л. Брэгга [18]. В 1913 г. Профессор Г.В. Вульф первым в России начал рентгеноструктурные исследования и предложил создать в МГУ кафедру рентгеноструктурного анализа, значение которого в исследованиях атомного строения вещества все более возрастало. После



Рис. 10. Крейсер «Аврора»

Fig. 10. Cruiser "Aurora"



Рис. 11. Г.В. Вульф

Fig. 11. G.V. Wulf

смерти Г.В. Вульфа для организации и руководства новой специальностью в 1927 г. на существовавшую в то время должность приват-доцента был приглашен один из пионеров применения рентгеновских лучей для изучения структуры металлов С.Т. Конобеевский (1890–1970 гг.), рис. 12. В течение нескольких лет на этой кафедре был создан специальный рентгеновский практикум, в котором были представлены все современные методы структурного анализа, начата работа по конструированию новых типов рентгеновской аппаратуры и развернута научно-исследовательская работа, направленная на изучение актуальных проблем металлофизики. Возглавляемая С.Т. Конобеевским кафедра рентгеноструктурного анализа успешно осуществляла подготовку квалифицированных специалистов в области рентгеноструктурного анализа. Вскоре физфак МГУ стал одним из основных центров обучения советских специалистов по рентгенографии [19].

В планы автора данной статьи не входит детальное изложение истории развития работ по применению рентгеновских лучей в медицине. Для этого в нашей стране есть квалифицированные специалисты медики. Однако в заключение этого раздела не могу не привести информацию о «рентгеномобилях» инженера Н.А. Федорицкого [20]. Применение рентгеновских лучей для диагностики оказалось особенно важным для военной медицины: у хирурга появилась возможность увидеть



Рис. 12. С.Т. Конобеевский

Fig. 12. S.T. Konobeevsky

в теле положение дробинок, пуль или осколков. Работа по их обнаружению и извлечению стала целенаправленной. В русской армии в самом начале Первой мировой войны вопрос об организации передвижных «летучих» рентгеновских кабинетов по инициативе проф. Н.А. Вельяминова обсуждался во Всероссийском обществе Красного креста. Технический проект автомобиля-рентгеновского кабинета подготовил талантливый инженер-технолог Николай Александрович Федорицкий (1867–1925 гг.). Он более 10 лет проводил опыты с разреженными газами, благодаря чему смог создать рентгеновскую трубку «впервые в России, исключительно из русских материалов и русским трудом» [20]. Созданная им рентгеновская трубка оказалась не хуже зарубежных, и 1 мая 1913 г. в С.-Петербурге на набережной Фонтанки, где располагалась его мастерская, в двух комнатах он открывает небольшой завод. В конце 1913 г. Н.А. Федорицкий впервые представляет рентгеновские трубки своего производства на выставке хирургического съезда в Музее Пирогова. Мастерская получила заказы, и производство стало понемногу расширяться, стремясь удовлетворить растущий спрос. В июле 1914 г. спрос на трубки в связи с потоком раненых чрезвычайно вырос. Для решения этой проблемы правительством был выделен кредит на расширение производства и военный заказ. В течение двух недель производство было спешно расширено и превратилось в Первый русский завод трубок Рентгена. Н.А. Федорицкому удалось найти стеклодувов, которые экспериментальным путем подобрали состав стекла, пропускающий рентгеновские лучи и стойкий к длительному локальному нагреву, и отработали технологию впайки электродов в стеклянную колбу без использования эмали. Весь самый сложный процесс изготовления рентгеновских трубок из поставляемых стеклянных и металлических заготовок происходил по оригинальным технологиям завода, К 1915 г. завод выпустил более тысячи рентгеновских трубок двенадцати различных типов, работавших по всей России. На рис. 13 представлен вариант рентгеновского кабинета Н.А. Федорицкого «московского типа» на шасси Hotchkiss (вариант в походном положении).



Рис. 13. Рентгеновский кабинет Н.А. Федорицкого «московского типа» на шасси Hotchkiss – первый вариант в походном положении.

Fig. 13. The x-ray room of N. A. Fedoritsky "Moscow type" on the Hotchkiss chassis is the first option in the marching position

Один такой кабинет обслужил в 1915 г. 21 госпиталь (лазарет), где за 50 рабочих дней было сделано 684 просвечивания и 160 снимков [20].

РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СССР (1918–1950 гг.)

Большой вклад в развитие рентгеновских исследований в нашей стране внёс организованный в 1918 г. в Петербурге Государственный Институт рентгеновских и радиологических исследований. Один из организаторов этого института Абрам Фёдорович Иоффе (1880–1960 гг.) (рис. 14), российский и советский физик [8, 11, 21], в 1902 г. окончил С.-Петербургский практический технологический институт, через три года – Мюнхенский университет в Германии, где, работая под руководством В.К. Рентгена, он получил степень доктора наук. А.Ф. Иоффе создаёт и возглавляет физико-технический отдел этого института, являясь также Президентом института (директором был профессор М.И. Немёнов). В 1921 г. он стал директором Физико-технического института, созданного на основе отдела (теперь этот институт носит имя А.Ф. Иоффе). В 1919 г. руководителем рентгеновской лаборатории, а затем и рентгентехнического отдела становится Н.Я. Селяков. Он окончил физико-математический факультет Московского университета в 1913 г. с дипломом первой степени. Ещё будучи студентом университета, Н.Я. Селяков начал научно-исследовательскую работу под руководством академика П.П. Лазарева в Лебедевской лаборатории [22]. С 1914 г. Н.Я. Селяков с группой сотрудников организует рентгеновские кабинеты в лазаретах и госпиталях г. Москвы. В 1918 г. он стоит во главе рентгеновского бюро Союза городов и земств. В физико-техническом институте Николай Яковлевич работает тринадцать лет. В лабораториях этого института была создана научная база для исследований по рентгенофизике и развития рентгенографического анализа в СССР. Сотрудниками Н.Я. Селякова по рентгеновской лаборатории были



Рис. 14. А.Ф. Иоффе

Fig. 14. A.F. Ioffe

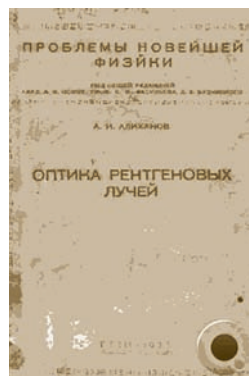


Рис. 15. А.И. Алиханов и обложка его книги

Fig. 15. A.I. Alikhanov and the cover of his book

будущие академики М.И. Корсунский, Г.В. Курдюмов, А.И. Алиханова и другие. Можно отметить выполненные в этом Институте работы А.И. Алиханова (1904–1970 гг.) (рис. 15) по полному отражению от тонких слоёв металлов [23]¹, классические работы П.И. Лукирского (1894–1954 гг.) и его исследования рентгеновского излучения в области 1–15 нм (рис. 16). П.И. Лукирский впервые обнаружил поляризацию рентгеновских лучей при комптоновском рассеянии [24].

М.И. Корсунский (1903–1976 гг.) (рис. 17) родился в г. Ростове-на-Дону, начал свою научную деятельность в Ленинградском физико-техническом институте, сначала в лаборатории проф. Н.Я. Селякова, а потом в лаборатории академика А.Ф. Иоффе. После окончания в 1926 г. физико-механического факультета Ленинградского политехнического института М.И. Корсунский создаёт первую в Советском Союзе учебную рентгеновскую лабораторию. Первые научные работы М.И. Корсунского посвящены анализу химического состава веществ с помощью рентгеновских лучей, определению абсолютных длин волн рентгеновского излучения и вопросам оптики рентгеновских лучей. Эти работы подготовили издание первой в нашей стране монографии по физике рентгеновских лучей [25].

Начало рентгеноспектральному анализу (РСА) положил английский физик Г. Мозли, который заметил, что линии Си сильнее линий Zn в рентгеновском спектре образца латуни (1913 г.).

¹ Необходимо отметить, что с 1931 г. в работах с рентгеновским излучением вместе с А.И. Алихановым участвовал будущий профессор М.А. Блохин (см. далее).



Рис. 16. П.И. Лукирский

Fig. 16. P.I. Lukirsky



Рис. 17. М.И. Корсунский

Fig. 17. M.I. Korsunsky

Практическое применение РСА по первичным спектрам, возбуждённым электронами, относится к 1922 г. В лаборатории выдающегося геохимика В.М. Гольдшмидта первый рентгеноспектральщик А. Хаддинг определил химический состав ряда минералов. С помощью рентгеновских лучей открыты два элемента, ранее неизвестных, но предсказанных ещё Д.И. Менделеевым. В 1923 г. Д. Хевеши и Д. Костер обнаружили 72-й элемент Hf, а в 1925 г. супруги Ноддак открыли 75-й элемент – Re.

Следующий шаг в развитии РСА сделали в 1928 г. Р. Глокер и Х. Шрайбер – они положили начало использованию вторичного (флуоресцентного) характеристического рентгеновского излучения. Это ознаменовало рождение разновидности метода РСА – рентгенофлуоресцентного анализа (**РФА**), реализация которого оказалась проще, а предел обнаружения на 1-2 порядка лучше, чем у РСА по первичному спектру. Детальное описание особенностей РФА можно найти в ряде монографий [26–30].

Длительное время рентгенофизики нашей страны считали, что первая публикация по применению рентгеновских лучей для целей количественного анализа в Советском Союзе датирована 1932 г. [31, 32]. Среди тех, кто первым применил флуоресцентное рентгеновское излучение для анализа называли Н.Д. Борисова и Я.М. Фогеля (1909–1977 гг.) [33] (рис. 18). Однако при этом незаслуженно забыта работа 1930 г. с участием Н.Я. Селякова [34]. Ссылки на эту



Рис. 18. М.Я. Фогель

Fig. 18. M.Ya. Vogel

работу можно найти в переводной монографии Р. Глокера [35] и обзорной работе Ю.Г. Лаврентьева [5].

Будем же благодарны тем, кто раскрыл перед нами потенциальные возможности невидимого рентгеновского излучения.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СССР (1951–1990 гг.)

В послевоенный период в нашей стране доминировали группы по исследованию и применению рентгеновского излучения, возглавляемые Игорем Борисовичем Боровским (1909–1985 гг., Москва) (рис. 19), Михаилом Арнольдовичем Блохиным (1908–1995 гг., Москва и Ростов-на-Дону) (рис. 20),



Рис. 19. И.Б. Боровский

Fig. 19. I.B. Borovsky



Рис. 20. М.А. Блохин

Fig. 20. M.A. Blokhin



Рис. 21. Э.Е. Вайнштейн

Fig. 21. E.E. Weinstein



Рис. 22. Р.Л. Баринский

Fig. 22. R.L. Barinsky



Рис. 23. Н.Ф. Лосев

Fig. 23. N.F. Losev

Эммануилом Ефимовичем Вайнштейном (1917–1966 гг.) (рис. 21), Константином Иосифовичем Нарбуттом (Москва), Романом Львовичем Баринским (1924–2019 гг., Москва) (рис. 22), Андреем Петровичем Лукирским (Ленинград), Николаем Фомичом Лосевым (1927–1999 гг., Иркутск) (рис. 23).

Боровский И.Б. родился в Санкт-Петербурге. В 1930 г. он окончил Ленинградский политехнический институт (специальность инженер-физик). В 1931 г. его пригласили на работу в минералогический музей им. М.В. Ломоносова на должность заведующего рентгеноспектральной лабораторией. В 1950–1952 гг. И.Б. Боровский был и.о. зав. кафедрой рентгеноструктурного анализа в МГУ. В 1939 г. вышла в свет с его соавторством первая отечественная монография по рентгеноспектральному анализу

[36]. В конце 50-х годов под руководством и при участии И.Б. Боровского был создан практически одновременно с Р. Кастеном (Франция) первый советский электронно-зондовый микроанализатор для локального рентгеноспектрального анализа [37]. В 1956 г. И.Б. Боровским опубликована монография «Физические основы рентгеноспектральных исследований. М.: Изд-во МГУ, 463 с.». Дополнительную информацию о вкладе И.Б. Боровского в исследования по применению рентгеновского излучения можно найти в работах [38, 39].

В начале своей научной деятельности М.А. Блохин (1908–1995 гг.) участвовал с группой А.И. Алиханова (1931–1934 гг.) в исследовательских работах с рентгеновским излучением, предпринятых в Ленинградском физико-техническом институте по инициативе ученика В.К. Рентгена академика А.Ф. Иоффе [40, 41]. По его предложению М.А. Блохин занялся исследованиями рентгеновских спектров, которым он посвятил всю свою жизнь. Им созданы превосходные для своего времени конструкции рентгеновских приборов для исследования тонкой структуры рентгеновских спектров и рентгеноспектрального анализа химического состава вещества. Сотни этих приборов широко разошлись по всей стране. Он автор более 250 научных работ. С участием М.А. Блохина написаны монографии [12, 26, 36]. Работа [12] не нуждается в «презентации». С момента выхода её первого издания (1953 г.) и по настоящее время она является настольной книгой каждого рентгеноспектральщика². Вводные главы по физическим основам РСА во многих отечественных и зарубежных монографиях написаны на её основе. Современное состояние теоретических основ физики рентгеновского излучения изложено в монографии Г.В. Павлинского [42].

Э.Е. Вайнштейн в 1930 г. поступил в Ростовский филиал Новочеркасского промышленного института, перевёлся в Ленинградский политехнический институт, который окончил в 1938 г. по специальности «экспериментальная физика». В 1942 г., защитил кандидатскую диссертацию «Рентгеноспектроскопическое изучение изгиба некоторых кристаллов» в Казанском государственном университете и был принят на работу руководителем рентгеноспектральной лаборатории. С 1946 г. – участник советского атомного проекта. В 1954–1960 гг. – заведующий созданной им лаборатории спектральных методов анализа. В 1959 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Исследование в области рентгеноспектрального анализа». Руководил работами по усовершенствованию и созданию новой рентгеноспектральной аппаратуры. Автор 4 монографий [43–46].

² У каждого автора есть предшественники. В частности, по монографии М.А. Блохина [12] можно указать работы [23–25, 35], а также и, несомненно, книгу Compton A.H. и Allison S.K. (X-Rays in Theory and Experiment. 2 ed. N.Y.: Princeton, D. Van Nostrand, 1935. 828 p.). В 1956 г. И.Б. Боровский опубликовал свой вариант физических основ РСА. Тем не менее, это не снизило интерес рентгенофизиков к работе [12].

Р.Л. Баринский окончил физический факультет МГУ и с 1954 г. до выхода на пенсию в 2016 г. (62 года!!!) работал в Институте минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ). Тематика его исследований была связана с применением возможностей рентгеновской спектроскопии в области структурной химии, минералогии, физике твердого тела. Он автор книги «Рентгено-спектральное определение заряда атомов в молекулах» (изд. «Наука», Москва, 1966). Последние несколько десятилетий Р.Л. Баринский разрабатывал методики рентгенофлуоресцентного анализа разнообразных геологических материалов: бокситов, титаномagneтитовых, целестиновых, апатит-карбонатных руд, продуктов технологической переработки песков, метасоматических горных пород, почв, донных осадков. Разработанная Баринским Р.Л. методика определения содержания 14 редкоземельных элементов в минеральном сырье дала импульс развитию редкоземельной сырьевой базы нашей страны и несколько десятилетий служила основой для совершенствования других методик. Предложенные им методики проверены на практике в ряде регионов России и доказали свою эффективность.

Николай Фомич Лосев, ученик проф. М.А. Блохина – признанный лидер Иркутской школы рентгеноспектрального анализа. После окончания в 1951 г. Ростовского-на-Дону госуниверситета он приехал по распределению в г. Иркутск. Первоначально он работал в физической лаборатории НИИ «Иргиредмета». Начальный этап его работы связан с исследованиями тонкой структуры рентгеновских спектров под руководством А.С. Ивойлова (рис. 24). Однако вскоре (1956 г.) ему пришлось сменить направление исследований и заняться разработкой методик рентгенофлуоресцентного определения редких металлов в рудах и продуктах



Рис. 24. Иркутские рентгенофизики в Ленинграде. Слева направо: Н.Ф. Лосев, Е.К. Васильев, А.А. Кашаев, А.С. Ивойлов, В.А. Дриц, Е.М. Сельдишев (VI научно-техническое совещание по применению рентгеновских лучей к исследованию материалов, 1958 г.)

Fig. 24. Irkutsk X-ray-physicists in Leningrad. From left to right: N.F. Losev, E.K. Vasiliev, A.A. Kashaev, A.S. Ivoilov, V.A. Drits, E.M. Seldishev (VI scientific and technical meeting on the application of x-rays to the study of materials, 1958)

их обогащения. Необходимо отметить, что в 50–70 гг. для большинства специалистов рентгенофизиков характерно то, что основное внимание в своих исследованиях они уделяли проблеме влияния химических связей на положение и форму линий рентгеновского спектра. Н.Ф. Лосев единственный из них с середины 50-х годов сосредоточился на исследовании проблем РСА. Темы его кандидатской диссертации (Исследование способа внешнего стандарта для рентгеноспектрального анализа минерального сырья, Иркутск, 1960 г.) и докторской диссертации (Теория возбуждения рентгеновской флуоресценции и способы нахождения простых связей между интенсивностью рентгеновской флуоресценции и элементным составом излучателя, Ростов-на-Дону, 1968 г.) подтверждают это.

В первой публикации Н.Ф. Лосева по РФА [47] описаны результаты разработки методики определения Ti по вторичным рентгеновским спектрам. Анализировалась титановая руда и продукты её переработки. Содержание TiO_2 изменялось в пределах 0.9–55 % мас. Отмечено существенное влияние Fe и Ca на интенсивность аналитической линии TiK_{α} -линии. Использование пятикратного разбавления рудой, состоящей в основном из кварца, позволило автору использовать способ внешнего стандарта. Отметим, что из 18 работ, опубликованных в журнале [47] по материалам 2-го Всесоюзного совещания по рентгеновской спектроскопии (г. Москва, 1957 г.) только работа Н.Ф. Лосева относится к РФА. Аналогичное утверждение справедливо и для публикации материалов 4-го Всесоюзного совещания по рентгеновской спектроскопии (г. Москва, 1959 г.) [48]. Н.Ф. Лосев предложил и теоретически обосновал оригинальный экспрессный способ учёта взаимного влияния элементов для РФА материалов переменного химического состава и реализовал его в конкретных методиках для определения Zr, Nb, Ta, Ga и Ge [48, 49], что составило основу его кандидатской диссертации.

В период расцвета в 80-е годы в Иркутских лабораториях РСА работало до 80 сотрудников. При этом сотрудники из группы Н.Ф. Лосева тесно взаимодействовали с группой проф. М.А. Блохина. На следующем фото (рис. 25) запечатлён рабочий



Рис. 25. М.А. Блохин, В.П. Афонин, Н.Ф. Лосев, Иркутск, 1966.

Fig. 25. M.A. Blokhin, V.P. Afonin, N.F. Losev, Irkutsk, 1966.



Рис. 26. В.П. Афонин

Fig. 26. V.P. Afonin

момент обсуждения результатов исследований. Из иркутской группы считаю необходимым выделить В.П. Афонина (1938–1995 гг.) (рис. 26). Одна из наиболее цитируемых российских работ по РФА – известная работа с его участием по влиянию крупности зёрен минеральных частиц на интенсивность рентгеновской флуоресценции [50]. Трудно переоценить его вклад в разработку теории возбуждения флуоресцентного излучения в длинноволновой области рентгеновского спектра. Он один из тех, кто разрабатывал основы РФА элементов с малыми атомными номерами, что обеспечило успешное внедрение силикатного анализа. Он многое привнёс как в РФА, так и в электроннозондовый микроанализе (**ЭЗМА**) [29, 51, 52]. Более подробную информацию об истории развития Иркутской школы РСА, созданной Н.Ф. Лосевым, и основных результатах выполненных исследований, можно найти в публикациях [53–59].

Становление и развитие рентгеновского научного и промышленного приборостроения в нашей стране связано с именем Н.И. Комяка (1928–2000 гг.) (рис. 27) [60, 61]. Он окончил Ленинградский электротехнический институт в 1953 г. Н.И. Комяк был руководителем Специального конструкторского бюро рентгеновской аппаратуры (СКБРА, 1958–1973 гг.) и генеральным директором НПО «Буревестник» (1974–1980 гг.). В 1995–2000 гг. был директором Института аналитического приборостроения РАН. Н.И. Комяк организовал создание необходимых элементов сложной рентгеновской техники: детекторы разнообразных типов разрабатывались и производились в НПО «Буревестник»; было создано совре-



Рис. 27. Н.И. Комяк

Fig. 27. N.I. Komiak



Рис. 28. М.А. Кумахов

Fig. 28. M.A. Kumakhov

менное вакуумное производство, на котором также выпускалось несколько видов рентгеновских трубок для рентгеновской микроскопии; создана база для выращивания монокристаллов новых типов и налажено производство кристалл-анализаторов; было выпущено более 2000 дифрактометров общего назначения; создана и внедрена аппаратура для рентгенолюминесцентной сепарации минерального сырья (в т.ч. для алмазодобывающей промышленности); разработанные в НПО многоканальные рентгеновские спектрометры (квантометры) выпускались Орловским заводом научного приборостроения большими партиями [61].

В конце XX века на нашем рентгеновском небосклоне ярко засияла звезда Мурадина Абубекировича Кумахова (1941–2014 гг.) (рис. 28) [62–64]. М.А. Кумахов окончил отделение ядерной физики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова в 1964 г. До 1978 г. он работал в Институте ядерной физики МГУ, в дальнейшем – в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова В 80-е гг. разработал устройства и способы для управления (фокусирования) рентгеновским и более жёстким излучением, которые в мировом научном сообществе названы «оптикой Кумахова» или «линзой Кумахова». В начале 21 века специалисты выделяли четыре поколения рентгеновских линз [65]. С. Дабагов отмечал, что усилиями большого числа исследователей «за последние 15 лет рентгеновская капиллярная оптика из очень красивой и простой идеи выросла в самостоятельное, интенсивно исследуемое направление в оптике».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение необходимо отметить следующее. Цитата из обзора Н.П. Ильина [32]: «Нашими специалистами разрабатывались практически все основные направления рентгеноспектрального анализа, а в решении ряда теоретических и методических вопросов они опережали своих зарубежных коллег». Во второй половине XX века – это, например, вариант электроннозондового микроанализатора, предложенный И.Б. Боровским и Н.П. Ильиным практически одновременно с Кастеном; разработка и применение энергодисперсионного

анализатора «Рифма» для определения содержания породобразующих элементов на луноходе в 1970 г.; исследование влияния крупности зёрен на интенсивность рентгеновской флуоресценции (Лосев Н.Ф., Глотова А.Н., Афонин В.П.); пионерские работы по применению теоретических интенсивностей для оценки взаимных влияний элементов и выбора оптимального способа анализа (Лосев Н.Ф., Павлинский Г.В. и др.); линза Кумахова и т.д.

“Feci quod potui faciant meliora potentes”, что означает: «Я сделал, что смог, пусть те, кто сможет, сделают лучше». Дополнительные биографические данные о коллегах-современниках представлены в работах [65, 66]. В биографическом справочнике [65] можно найти информацию о вкладе: Р.Л. Баринского, В.Я. Борходоева, И.А. Брытова, Д.А. Гоганова, Т.Н. Гуничевой, Б.Д. Калинина, Б.И. Китова, М.А. Кумахова, Т.А. Куприяновой, Ю.Г. Лаврентьева, Е.И. Молчановой, Г.В. Павлинского, А.Г. Ревенко, В.А. Симакова, А.Н. Смагуновой, М.Н. Филиппова, А.Л. Финкельштейна, А.Л. Якубовича. В книге [66] в разделе «Биографии» рассказано об Учителе М.А. Блохине и коллегах Г.В. Павлинском, А.П. Никольском, Р.И. Плотникове и В.И. Карманове.

И последнее. Слова С.А. Есенина напоминают: «Лицом к лицу Лица не увидать. **Большое видится на расстояньи.**»

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает свою благодарность А.Л. Финкельштейну, Б.Д. Калинин, Ш.И. Дуймакаеву за их помощь и поддержку при сборе материала и подготовке рукописи к печати.

ACKNOWLEDGEMENTS

The Author is grateful to A.L. Finkelshtein, B.D. Kalinin and S.I. Duimakaev for their help with the preparation of the manuscript.

ЛИТЕРАТУРА

1. Röntgen W.C. Über eine neue Art von Strahlen. Sitzungsber. Med.-phys. Ges., 1895. S. 132. [Электронный ресурс]: https://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/archivos_10/Uber_eine_neue_art_von_strahlen_ocr.pdf (дата обращения 04.03.20)
2. Френкель В.Я. Двойной юбилей: 150-летие со дня рождения Вильгельма Конрада Рентгена (1995 г.) и 100-летие со дня публикации статьи об открытии рентгеновских лучей (1996) // Физика твёрдого тела. 1996. Т. 38, № 9. С. 2609–2630.
3. One Hundred Years of X-rays. Eds. Michette A., Pfauntsch S., Wiley & Sons: New York, 1996. 262 p.
4. Васильев Е.К. История развития рентгеновских исследований // Применение рентгеновских лучей в науке и технике. Докл. научн. конф. посвящённой 100-летию открытия рентгеновских лучей и 150-летию со дня рождения В.К. Рентгена. Иркутск: ред.-изд. отдел ИГУ. 1996. С. 3–6.

5. Лаврентьев Ю.Г. Научные совещания по рентгеновской спектроскопии и рентгеноспектральному анализу как отражение процесса становления и развития отечественного рентгеноспектрального микроанализа // Аналитика и контроль. 2013. Т. 17, № 3. С. 252–274.
6. Смагунова А.Н., Ревенко А.Г. Развитие отечественного рентгенофлуоресцентного анализа (по материалам совещаний) // Журн. аналит. химии. 2014. Т. 69, № 3. С. 316–332.
7. Радомский М.И. Александр Попов. М.: Молодая гвардия, 2009. 295 с.
8. Храмов Ю.А. Физики: Биографический справочник. М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. литературы, 1983. 2-е изд. 400 с.
9. Буссемер П., Ржевский В.В. К истории учебника физики О.Д. Хвольсона // Природа. 2016. № 10. С. 68–76.
10. Путешествие по улице Карла Маркса. Составитель Ю.П. Колмаков. Иркутское обл. отд. ВООПИК. 1988. 30 с.
11. Иоффе А.Ф. Советские физики и дореволюционная физика в России // Успехи физических наук. 1947. Т. 33, № 4. С. 453–468.
12. Блохин М.А. Физика рентгеновских лучей. 1-е изд. М.: ГИТТЛ, 1953. 456 с.; 2-е изд. 1957. 518 с.
13. Поленов Л.Л. Крейсер «Аврора». Серия «Замечательные корабли». Л.: Судостроение, 1987. 264 с.
14. Wulf G. Über die Kristallröntgenogrammen // Phys. Ztschr. 1913. Jg. 14, № 6. S. 217–220.
15. Bragg W.L. The specular reflection of x-rays // Nature. 1912. V. 90. P. 410.
16. M. Laue Interferenzerscheinungen bei Röntgenstrahlen // Ann. Phys. 1913. Bd. 41, S. 971–998.
17. Bragg W.L. The diffraction of short electromagnetic waves by a crystal (lecture, 11 Nov., 1912) // Proc. Cambridge Philos. Soc. 1913. V. 17. P. 43–57.
18. Смолеговский А.И., Зоркий П.М. К 100-летию со дня рождения У.Л. Брэгга // Проблемы кристаллохимии. 1991. М.: Наука. С. 187–205.
19. Иверонова В.И., Курдюмов Г.В., Уманский Я.С. Сергей Тихонович Конобеевский (К восьмидесятилетию со дня рождения) // Успехи физических наук. 1970. Т. 101, № 2. С. 348–351.
20. Суворов С. Рентгеномобили инженера Федорицкого. [Электронный ресурс] <http://www.gruzovikpress.ru/article/3410-rentgenmobili-injenera-fedoritskogo/> (дата обращения 04.03.2020)
21. Кикоин И.К. А.Ф. Иоффе (К шестидесятилетию юбилею) // Успехи физических наук. 1940. Т. 24, № 1. С. 2–10.
22. Имена вологжан в науке и технике. [Электронный ресурс]: <https://www.booksite.ru/fulltext/ime/nav/olo/gzh/an/3.htm> (дата обращения 03.03.2020)
23. Алиханов А.И. Оптика рентгеновских лучей. М.: ГТТИ, 1933. 104 с.
24. Лукирский П.И. О фотоэффекте. М.: Гостехиздат, 1933. 97 с.
25. Корсунский М.И. Физика рентгеновских лучей. М.: ОНТИ, 1936. 302 с.
26. Блохин М.А. Методы рентгеноспектральных исследований. М.: Физматгиз, 1959. 366 с.
27. Лосев Н.Ф. Количественный рентгеноспектральный флуоресцентный метод анализа. М.: Наука, 1969. 336 с.
28. Лосев Н.Ф., Смагунова А.Н. Основы рентгеноспектрального флуоресцентного анализа. М.: Химия, 1982. 282 с.
29. Рентгенофлуоресцентный анализ / В.П. Афонин [и др.]. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1991. 173 с.

30. Ревенко А.Г. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов. Новосибирск: ВО «Наука», Сиб. Издательская фирма, 1994. 264 с.
31. Нарбутт К.И. Современное состояние рентгено-спектрального анализа // Заводск. лаборатория. 1958. Т. 24, № 5. С. 604-613.
32. Ильин Н.П. К семидесятилетию журнала «Заводская лаборатория» и рентгеноспектрального анализа // Заводск. лаборатория. 2002. Т. 68, № 1. С. 24-37.
33. Я.М. Фогель. Физик. Учитель. Человек / Н.А. Азаренков [и др.] // Харьков: Вид-во «Підручник НТУ «ХПІ». 2010. 308 с.
34. Селяков Н.Я., Алексеева Е.Ф. Химический анализ на Са в рентгеновых лучах в корочке разгара оружейных стволов. // Журн. физ. химии. 1930. Т. 1, вып. 1. С. 47-51.
35. Глокер Р. Рентгеновские лучи и испытание материалов / Пер. с нем. [Под ред. Н.Я. Селякова и Я.И. Френкеля]. Л. – М.: Гос. техн.-теор. изд-во, 1932. 396 с.
36. Боровский И.Б., Блохин М.А. Рентгено-спектральный анализ. М.-Л.: ГОНТИ, 1939. 500 с.
37. Боровский И.Б., Ильин Н.П. Новый метод исследования химического состава в микрообъеме сплава // ДАН СССР. 1956. Т. 106, № 4. С. 654-656.
38. Тронева Н.В. К 100-летию со дня рождения. И.Б. Боровский – учёный, педагог, гражданин // Аналитика и контроль. 2009. Т. 13, № 4. С. 208.
39. Лапутина И.П. К истории группы рентгеноспектрального анализа института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН (РСМА ЛЛМВ ИГЕМ РАН) // Аналитика и контроль. 2009. Т. 13, № 4. С. 213-215.
40. Швейцер И.Г. Профессор Михаил Арнольдович Блохин // Михаил Арнольдович Блохин. К 80-летию со дня рождения. Ростов-на-Дону: РГУ, 1988. С. 3-6.
41. Филиппов М.Н. Михаил Арнольдович Блохин (1908-1995) // Тез. докл. VI Всерос. конф. по РСА. 2008. Краснодар: КубГУ. С. 105.
42. Павлинский Г.В. Основы физики рентгеновского излучения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 240 с.
43. Вайнштейн Э.Е. Рентгеновские спектры атомов в молекулах химических соединений и в сплавах. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. 208 с.
44. Вайнштейн Э.Е., Кахана М.М. Справочные таблицы по рентгеновской спектроскопии. М.: Изд. АН СССР, 1953. 271 с.
45. Вайнштейн Э.Е. Методы количественного рентгено-спектрального анализа. М.: Изд. АН СССР, 1956. 222 с.
46. Вайнштейн Э.Е. Светосильная аппаратура для рентгеноспектрального анализа. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 272 с.
47. Ивойлов А.С., Лосев Н.Ф. Количественное рентгено-спектральное определение титана по вторичным спектрам // Изв. АН СССР, сер. физ. 1957. Т. 21, № 10. С. 1465-1468.
48. Лосев Н.Ф. Способ внешнего стандарта в рентгеновском спектральном флуоресцентном анализе // Изв. АН СССР, сер. физ. 1960. Т. 24, № 4. С. 476-486.
49. Лосев Н.Ф. Учет взаимных влияний элементов при рентгеновском спектральном флуоресцентном анализе руд и минералов // Заводск. лаборатория. 1961. Т. 27, № 9. С. 1100-1104.
50. Лосев Н.Ф., Глотова А.Н., Афонин В.П. О влиянии крупности частиц порошковой пробы на интенсивность аналитических линий при рентгеноспектральном флуоресцентном анализе // Зав. лаб. 1963. Т. 29, № 4. С. 421-426.
51. Афонин В.П., Гуничева Т.Н., Пискунова Л.Ф. Рентгенофлуоресцентный силикатный анализ. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1984. 227 с.
52. Афонин В.П., Лебедь В.И. Метод Монте-Карло в рентгеноспектральном микроанализе. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1989. 110 с.
53. «Николай Фомич Лосев». Иркутск: Типография «Оттиск». 2003. 56 с.
54. Аналитический отдел Института геохимии им. А.П. Виноградова / Л.Л. Петров [и др.]. // Ж. аналит. химии. 2003. Т. 58, № 12. С. 1300-1308.
55. Смагунова А.Н., Павлинский Г.В. Иркутская школа РСА // Ж. аналит. химии. 2005. Т. 60, № 2. С. 205-210.
56. Pavlova L.A. Contribution of Siberian researchers to the development of electron probe X-ray microanalysis // X-Ray Spectrom. 2010. V. 39, № 1. P. 3-11.
57. Ревенко А.Г. К 75-летию со дня рождения профессора Валерия Петровича Афонина // Аналитика и контроль, 2013. Т. 17, № 3. С. 358-364.
58. Ревенко А.Г. Павлинский Гелий Вениаминович (80 лет со дня рождения) // Аналитика и контроль. 2015. Т. 19, № 1. С. 94-95.
59. Ревенко А.Г., Дуймакаев Ш.И. Смагунова Антонина Никоновна – к 85-летию со дня рождения // Аналитика и контроль. 2019. Т. 23, № 2. С. 274-290.
60. Van Grieken R. Editorial: X-ray spectrometry recently lost three of its editorial board members, including its founder and first editor-in-chief // X-Ray Spectrom. 2002. V. 31, № 4. P. 287-288.
61. Брытов И.А. Николай Иванович Комяк, организатор отечественного рентгеновского приборостроения, ученый и человек (к 90-летию юбилею) // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 4. С. 21-23.
62. Золотов Ю.А. Рентгеновская оптика Кумахов // Ж. аналит. химии. 2008. Т. 63, № 3. С. 229-230.
63. Мурадин Кумахов: Опередивший время. Жизнь и творчество / Сост. М.Г. Кумахов, А.М. Кумахов. Нальчик: Эльбрус, 2016. 216 с. (Серия «Наши знаменитости»).
64. Ревенко А.Г. Метеор на небосклоне // Мурадин Кумахов: Опередивший время. Жизнь и творчество. Сост. М.Г. Кумахов, А.М. Кумахов. Нальчик: Эльбрус. 2016. С. 109-116.
65. Дабалов С.Б. Канализация нейтральных частиц в микро- и нанокапиллярах // Успехи физических наук. 2003. Т. 173, № 10. С. 1083-1106.
66. Кто есть кто в российской аналитической химии: Доктора наук / Ред.-сост. Ю.А. Золотов, В.И. Ширямова. Изд. 2-е. М.: Изд-во ЛКИ, 2011. 208 с.
67. Дуймакаев Ш., Дуймакаева Т., Потыкало М. Теория и способы рентгеноспектрального флуоресцентного анализа. Гомогенные и гетерогенные среды. LAP Lambert Academic Publishing RU, 2019. 387 p.

REFERENCES

1. Röntgen W.C. Über eine neue Art von Strahlen. *Sitzungsber. Med.-phys. Ges.*, 1895. S. 132. Available at: https://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/archivos_10/Uber_eine_neue_art_von_strahlen_ocr.pdf (Accessed 04 March 2020).
2. Frenkel V.Ya. [Double anniversary: 150th anniversary of the birth of Wilhelm Conrad Roentgen (1995) and 100th anniversary of the publication of the article on the discovery of x-rays (1996)]. *Fizika tverdogo tela [Solid State Physics]*. 1996. vol. 38, no. 9, pp. 2609-2630 (in Russian).
3. *One Hundred Years of X-rays*. Eds. Michette A., Pfauntsch S., Wiley & Sons: New York, 1996. 262 p.

4. Vasil'ev E.K. [The history of the development of x-ray studies.] *Primenenie rentgenovskikh luchei v nauke i tekhnike. Dokl. Nauchnoi Konf. posviashchennoi 100-letiiu otkryitiia rentgenovskikh luchei i 150-letiiu so dnia rozeniiia W.C. Röntgen [Application of X-rays to Science and Technics. Rep. scientific conf. dedicated to the 100th anniversary of the discovery of x-rays and the 150th anniversary of the birth of W.C. Röntgen]*. Irkutsk: Ed.-Pr. Department ISU. 1996. P. 3-6 (in Russian).
5. Lavrent'ev Yu.G. [Scientific conferences on X-ray spectroscopy and to the X-Ray Spectral analysis as reflection of formation and development process of the Soviet/Russian X-Ray Spectral microanalysis]. *Analitika i kontrol' [Analytics and control]*, 2013, vol. 17, no. 3, pp. 252-274 (in Russian).
6. Smagunova A.N., Revenko A.G. [Development of domestic X-ray fluorescence analysis (according to the materials of conferences 999)]. *Zhurn. Analyt. Chem. [Journal of Analytical Chemistry]* 2014. vol. 69, no. 3, pp. 316-332 (in Russian). DOI: 10.7868/S0044450214010149
7. Radomsky M.I. *Aleksandr Popov [Alexander Popov]*. M.: Molodaia Gvardiia, 2009. 295 p. (in Russian).
8. Khramov Yu.A. *Fiziki. Biograficheskiy spravochnik [Physicists: Biographical reference book]*. Moscow: Nauka, Main editorial office of Phys. - Mat. references, 1983. 2nd ed. 400 p. (in Russian).
9. Bussemer P., Rzhnevsky V.V. [On the history of the textbook of physics by O. D. Khvolson]. *Priroda [Nature]*, 2016, no. 10, pp. 68-76 (in Russian).
10. *Puteshestvie po ulitse Karla Marksa [The journey down the street of Karl Marx]*. Compiled By Yu.P. Kolmakov. Irkutsk region otd. VOPIK. 1988. 30 c. (in Russian).
11. Ioffe A.F. [Soviet physicist and pre-revolutionary physics in Russia]. *Uspekhi fizicheskikh nauk [Advances of physical Sciences]*. 1947, vol. 33, no. 4, pp. 453-468 (in Russian).
12. Blokhin M.A. *Fizika rentgenovskikh luchey [X-ray Physics]*. Moscow: GITTL, 1953. 456 p.; 2nd ed. 1957. 518 p. (in Russian).
13. Polenov L.L. *Kreiser "Aurora". Seriya "Zamechatel'nye korabli [Cruiser "Aurora". A series of "Great ships"]*. L.: Shipbuilding, 1987. 264 p. (in Russian).
14. Wulf G. Über die Kristallröntgenogrammen. *Phys. Ztschr.*, 1913, Jg. 14, no. 6, ss. 217-220.
15. Bragg W.L. The specular reflection of x-rays. *Nature*. 1912. vol. 90. pp. 410.
16. Laue M. Interferenzerscheinungen bei Röntgenstrahlen. *Ann. Phys.*, 1913, vol. 41, pp. 971-998.
17. Bragg W.L. The diffraction of short electromagnetic waves by a crystal (lecture, 11 Nov., 1912). *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 1913, vol. 17, pp. 43-57.
18. Smolegovsky A.I., Zorky P.M. [To the 100th anniversary of the birth of W. L. Bragg]. *Problemy kristalokhimii [Problems of crystal chemistry]*. 1991. M.: Science. P. 187-205 (in Russian).
19. Iveronova V.I., Kurdyumov G.V., Umansky Ya.S. [Sergey Tikhonovich Konobeevsky (To the eightieth anniversary of his birth)]. *Uspekhi fizicheskikh nauk [Advances of physical Sciences]*. 1970. vol. 101, no. 2. pp. 348-351 (in Russian).
20. Suvorov S. [Rentgenomobile engineer Fedoritskogo]. Available at: <http://www.gruzovikpress.ru/article/3410-rentgenomobili-injenera-fedoritskogo/> (accessed 5 February 2020) (in Russian).
21. Kikoin I.K. [A.F. Ioffe (For the sixtieth anniversary)]. *Uspekhi fizicheskikh nauk [Advances of physical Sciences]*. 1940. vol. 24, no. 1. pp. 2-10 (in Russian).
22. [Names of Vologda citizen in science and technology]. Available at: <https://www.booksite.ru/fulltext/ime/nav/olo/gzh/an/3.htm> (accessed 3 March 2020)
23. Alikhanov A.I. *Optika rentgenovskikh luchei [Optics of x-rays]*. Moscow: GTTI, 1933. 104 p. (in Russian).
24. Lukirsky P.I. *O fotoeffekte [About the photoeffect]*. Moscow: Gostekhizdat, 1933. 97 p. (in Russian).
25. Korsunsky M.I. *Fizika rentgenovskikh luchei [X-ray Physics]*. M.-L.: ONTI, 1936. 302 p. (in Russian).
26. Blokhin M.A. *Metody rentgenospektral'nykh issledovaniy [Methods of x-ray spectral studies]*. Moscow: Fizmatgiz, 1959. 366 p. (in Russian).
27. Losev N.F. *Kolichestvennyi rentgenospektral'nyi fluorestsennyi analiz [Quantitative X-ray fluorescence analysis]*. Moscow, Science Publ., 1969. 336 p. (in Russian).
28. Losev N.F., Smagunova A.N. *Osnovy rentgenospektral'nogo fluorestsennogo analiza [Fundamentals of X-ray fluorescence analysis]*. Moscow, Chemistry Publ., 1982. 208 p. (in Russian).
29. Afonin V.P., Komyak N.I., Nikolaev V.P., Plotnikov R.I. *Rentgenofluorestsennyi analiz [X-ray Fluorescence analysis]*. Novosibirsk: Nauka, 1991. 173 p. (in Russian).
30. Revenko A.G. *Rentgenospektral'nyi fluorestsennyi analiz prirodnikh materialov [X-ray Spectral Fluorescence Analysis of Natural Materials]*. Novosibirsk: Nauka, 1994. 264 p. (in Russian).
31. Narbutt K.I. [Current state of X-ray spectral analysis]. *Zavodskaya laboratoriya [Industrial laboratory]*, 1958, vol. 24, no. 5. pp. 604-613 (in Russian).
32. Ilyin N.P. [For the seventieth anniversary of the journal "Industrial laboratory" and X-ray spectral analysis]. *Zavodskaya laboratoriya [Industrial laboratory]*, 2002, vol. 68, no. 1. pp. 24-37 (in Russian).
33. Azarenkov N.A., Bobkov V.V., Gritsyna V.V., Slabospitsky R.P. *Ya.M. Fogel. Fizik. Uchitel'. Chelovek [J.M. Vogel Physicist. Teacher. Person]*. Kharkov: Publ. "Pidruchnik NTU" HPI». 2010. 308 p. (in Russian).
34. Selyakov N.Ya., Alekseeva E.F. [Chemical analysis on Ca in X-rays in the crust of the height of the gun barrels]. *Zurnal Fizicheskoi Khimii [J. Phys. Chem.]* 1930. vol. 1, Issue. 1. pp. 47-51 (in Russian).
35. Glocker R. *X-rays and testing of materials*. [Edited By N.Ya. Selyakov and Ya.I. Frenkel]. L.-M.: State tech.- Theor. ed., 1932. 396 p.
36. Borovsky I.B., Blokhin M.A. *Rentgenospektral'nyi analiz [X-ray Spectral analysis]*. M. L.: GONTI, 1939. 500 c. (in Russian).
37. Borovsky I.B., Il'in N.P. [A new method for researching of the chemical composition in the micro volume of an alloy]. *Dokl. Akademii Nauk SSSR [DAS USSR]*. 1956, vol. 106, no. 4, pp. 654-656 (in Russian).
38. Troneva N.V. [To the 100th anniversary of his birthday. I.B. Borovsky – Scientist, Teacher, Citizen]. *Analitika i kontrol' [Analytics and control]*, 2009, vol. 13, no. 4, pp. 208 (in Russian).
39. Laputina I.P. [On the history of the X-ray spectral analysis group of the Institute of Geology of Ore deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM) of the Russian Academy of Sciences (RSMA LLMV Igem RAS)]. *Analitika i kontrol' [Analytics and control]*, 2009, vol. 13, no. 4, pp. 213-215 (in Russian).
40. Schweitzer I.G. [Professor Mikhail Arnol'dovich Blokhin]. *Mikhail Arnol'dovich Blokhin. K 80-letiiu so dnia rozeniiia [Mikhail Arnol'dovich Blokhin. For the 80th anniversary of his birthday]*. Rostov-on-Don: RGU, 1988. Pp. 3-6 (in Russian).
41. Filippov M.N. [Mikhail Arnol'dovich Blokhin (1908-1995)]. *Tez. Dokl. VI letiiu so dnia rozeniiia konf. po RSA*. [Abstr. rep.

- VI Vseros. Conf. at the XRF]. 2008. Krasnodar: Kuban State University. Pp. 105 (in Russian).
42. Pawlinski G.W. Physical fundamentals of X-ray physics. Cambridge Intern. Sci. Publ. Ltd, Cambridge, UK, 2008, 240 pp.
 43. Weinstein E.E. *Rentgenovskie spektry atomov v molekulakh khimicheskikh soedinenii i v splavakh* [X-ray spectra of atoms in molecules of chemical compounds and in alloys]. Moscow: Publishing house of the USSR Academy of Sciences. M.-L.: Publ. AS USSR, 1950. 208 p. (in Russian).
 44. Weinstein E.E., Kakhana M.M. Spravochnye tablitsy po rentgenovskoi spektroskopii [Reference tables for X-ray spectroscopy]. M.: Publ. AS USSR, 1953. 271 p. (in Russian).
 45. Weinstein E.E. Metody kolichestvennogo rentgenospektral'nogo analiza [Methods of quantitative X-ray spectral analysis] M.: Publ. AS USSR, 1956. 222 c. (in Russian).
 46. Weinstein E.E. Svetosil'naia apparatura dlia rentgenospektral'nogo analiza [High-speed equipment for X-ray spectral analysis]. M.: Publ. AS USSR, 1957. 272 c. (in Russian).
 47. Ivoilov A.S., Losev N.F. [Quantitative x-ray spectral determination of titanium by secondary spectra]. Izvestiia AN SSSR, Ser. Fiz. [Izv. USSR Academy of Sciences, Ser. Phys.]. 1957. vol. 21, no. 10. pp. 1465-1468 (in Russian).
 48. Losev N.F. [External standard method in X-ray spectral fluorescence analysis]. Izvestiia AN SSSR. Ser. Fiz. [Izv. USSR Academy of Sciences, Ser. Phys.] 1960. vol. 24, no. 4. pp. 476-486 (in Russian).
 49. Losev N.F. [Consideration of interelement effects of elements in X-ray spectral fluorescence analysis of ores and minerals]. Zavodskaya laboratoriia [Industrial laboratory], 1961, vol. 27, no. 9, pp. 1100-1104 (in Russian).
 50. Losev N.F., Glotova (Smagunova) A.N., Afonin V.P. [The effect of particle size of a powder sample on the intensity of analytical lines in X-ray fluorescence analysis]. Zavodskaya laboratoriia [Industrial laboratory], 1963, vol. 29, no. 4, pp. 421-426 (in Russian).
 51. Afonin V.P., Gunicheva T.N., Piskunova L.F. Rentgeno fluoressentsnyi silikatnyi analiz [X-ray Fluorescence Silicate Analysis]. Novosibirsk: Nauka, 1984. 227 p. (in Russian).
 52. Afonin V.P., Lebed V.I. Metod Monte Karlo rentgenospektral'nom analize [Monte Carlo Method in X-ray spectral microanalysis]. Novosibirsk: Nauka, 1989. 110 p. (in Russian).
 53. Nikolai Fomich Losev [Nikolai Fomich Losev]. Irkutsk: Publishing House "Imprint". 2003. 56 p. (in Russian).
 54. Petrov L.L., Vasilieva I.E., Gunicheva T.N., Kuznetsova A.I., Men'shikov V.I., Pavlova L.A., Prokopchuk S.I., Smirnova E.V., Finkelshtein A.L., Cykhanski V.D., Chumakova N.L. [Analytical Department of the Institute of Geochemistry named after A.P. Vinogradov]. Journal of Analytical Chemistry. 2003. vol. 58, pp. 1165-1173. <https://doi.org/10.1023/B:JANC.0000008957.71846.ca>
 55. Smagunova A.N., Pavlinsky G.V. [Irkutsk school of X-ray spectrochemical analysis]. Journal of Analytical Chemistry. 2005, vol. 60, no. 2, pp. 181-186. <https://doi.org/10.1007/s10809-005-0058-1>
 56. Pavlova L.A. Contribution of Siberian researchers to the development of electron probe X-ray microanalysis. X-Ray Spectrom. 2010, vol. 39, no. 1, p. 3-11. Doi: 10.1002/xrs.1228
 57. Revenko A.G. [On the 75th anniversary of prof. V.P. Afonin's birth]. Analitika i kontrol' [Analytics and Control], 2013, vol. 17, no. 3, pp. 358-364 (in Russian). <http://dx.doi.org/10.15826/analitika.2013.17.3.014>
 58. Revenko A.G. [Pavlinskii Helii Veniaminovich (80 years anniversary)]. Analitika i kontrol' [Analytics and Control], 2015, vol. 19, no. 1, pp. 94-95 (in Russian). <http://dx.doi.org/10.15826/analitika.2015.19.1.013>
 59. Revenko A.G., Duymakaev Sh.I. 85th birthday anniversary of Antonina Nikonovna Smagunova // Analitika i kontrol' [Analytics and control], 2019, vol. 23, no. 2, pp. 274-290 (in Russian).
 60. Van Grieken R. Editorial: X-ray spectrometry recently lost three of its editorial board members, including its founder and first editor-in-chief. X-Ray Spectrom. 2002, vol. 31, no. 4, p. 287-288. Doi: 10.1002/xrs.608
 61. Brytov I.A. [Nikolay Ivanovich Komyak, organizer of Russian X-ray instrument making, scientist and person (for the 90th anniversary)]. Nauchnoe priborostroenie [Sci. Instrum. Making], 2018, vol. 28, no. 4, pp. 21-23 (in Russian).
 62. Zolotov Y.A. Kumakhov's X-ray optics. Journal of Analytical Chemistry. 2008. vol. 63, no. 3. pp. 207-208. <https://doi.org/10.1134/S1061934808030015>
 63. Muradin Kumakhov: Operedivshii vremia. Zhizn' i tvorchestvo [Muradin Kumakhov: Ahead of time. Life and creativity] / Comp. M.G. Kumakhov, A.M. Kumakhov. Nalchik: Elbrus, 2016. 216 p. (Our celebrities Series) (in Russian).
 64. Revenko A.G. [Meteor in the sky]. [Muradin Kumakhov: Ahead of time. Life and creativity]. Comp. M.G. Kumakhov, A.M. Kumakhov. Nalchik: Elbrus, 2016. Pp. 109-116 (in Russian).
 65. Dabagov S.B. [Channeling of neutral particles in micro- and nanocapillaries]. Uspekhi fizicheskikh nauk [Advances of physical Sciences]. 2003, vol. 173, no. 10, pp. 1083-1106 (in Russian).
 66. Kto est' kto v rossiiskoi analiticheskoi khimii: Doktora nauk [Who is who in Russian analytical chemistry: Doctors of Science] / Ed. Yu.A. Zolotov, V.I. Shiryamova. The 2nd Ed. Moscow: LCI, 2011. 208 p. (in Russian).
 67. Duymakayev Sh., Duymakayeva T., Pot'kalo M. Teoriia i sposoby rentgenospektral'nogo fluorestsennogo analiza. Gomogennye i geterogennye sredy [Theory and methods of X-ray spectral fluorescence analysis. Homogeneous and heterogeneous media]. LAP Lambert Academic Publishing RU, 2019. 387 p. (in Russian).